



国内外地面沉降现状与研究

崔振东¹, 唐益群^{1,2}

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土工程重点实验室, 上海 200092)

摘要:系统地介绍了国内外地面沉降的现状、引起沉降的原因、地面沉降的机理和地面沉降灾害预测与监测。特别针对上海地区随着大规模的城市建设产生的由工程环境效应引起的地面沉降及其监测与研究做了阐述。

关键词: 地面沉降; 地质灾害; 工程环境效应

中图分类号: P642.26 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2007)03-0275-04

Domestic and International Recent Situation and Research of Land Subsidence Disasters

CUI Zhen-dong¹, TANG Yi-qun^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The domestic and international recent situation of land subsidence, the causes, the mechanism, and the forecast and monitoring for land subsidence are introduced systemically, especially focus on the land subsidence in Shanghai caused by engineering and environmental effects along with the city construction in large scale in recent years.

Key words: Land subsidence; Geological hazards; Engineering and environmental effects

0 引言

地面沉降是在自然和人为因素作用下,由于地壳表层土体压缩而导致区域性地面标高降低的一种环境地质现象,是一种不可补偿的永久性环境和资源损失。地面沉降具有生成缓慢、持续时间长、影响范围广、成因机制复杂和防治难度大等特点,是一种对资源利用、环境保护、经济发展、城市建设和人民生活构成威胁的地质灾害。地面沉降是我国乃至世界范围较为普遍的地质灾害,对社会经济的可持续发展影响巨大。

1 地面沉降现状

1.1 国外地面沉降现状

现有文献资料表明,1891年墨西哥城最早记录地面沉降现象,但当时由于地面沉降量不大,危害也不明显^[1],所以没有引起人们的重视。目前平均沉降量达到0.3 cm/a,最大累计沉降量超过7.5 m,有的地区甚至超过15 m。

日本于1898年在新泻最早发生地面沉降,至1958年地面沉降速率达530 mm/a,1952—1956年新泻是日本地面沉降最严重的地区。日本产生严重地面沉降的城市或地区还有东京、大阪和佐贺县平原,其它地区还有名古屋、川崎、山口、尼崎及西宫等^[2]。

上个世纪意大利的Ravenna地区发生了大面积的地面沉降^[3-4]。起初沉降不大,每年数毫米;第

收稿日期:2007-01-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40372124)

作者简介:崔振东(1978—),男(汉族),山东莒南人,博士生,主要从事工程地质与土木工程方面的研究。

二次世界大战后,由于过度抽取地下水,以每年 110 mm 的沉降量剧增。

美国于 1922 年最早在加州萨克拉门托 San Joaquin 流域发现沉降,1920—1969 年地下水位下降达 137 m,累积地面沉降达 2.6 m,影响范围 9 100 km²。至 20 世纪 70 年代初期,美国已有 37 个州因开采地下流体而产生的不同程度的地面沉降现象;至 1995 年,美国 50 个州均有地面沉降发生^[5]。

据统计^[6],目前世界上已有 60 多个国家和地区发生地面沉降,包括美国、中国、日本、墨西哥、意大利、泰国、英国、俄罗斯、委内瑞拉、荷兰、越南、匈牙利、德国、印度尼西亚、新西兰、比利时、南非等。

1.2 国内地面沉降现状

20 世纪 20 年代初,中国最早在上海和天津市发现地面沉降灾害,至 20 世纪 60 年代两地地面沉降灾害已十分严重^[7]。20 世纪 70 年代,长江三角洲主要城市及平原区、天津市平原区、华北平原东部地区相继产生地面沉降;80 年代以来,中小城市和农村地区地下水开采利用量大幅度增加,地面沉降范围也由此从城市向农村扩展,在城市上连片发展。同时地面沉降地区伴生的地裂缝加剧了地面沉降灾害^[8-10]。

自 1921 年上海市区最早发现地面沉降以来,至今中国已有 90 多个城市和地区发生不同程度的地面沉降,到 2003 年沉降面积达 93 885 km²^[11]。代表性地区有上海,天津,浙江的宁波、嘉兴,江苏的苏州、无锡、常州,河北的沧州、唐山、衡水、保定、任丘、南宫,山东的菏泽、济宁、德州,安徽的阜阳,山西的临汾、太原、大同,河南的安阳、开封、洛阳、许昌、郑州,台湾的台北、彰化、屏东等 8 个县市,陕西的西安,北京和松辽平原等。在这些地区中最为突出的是以上海为代表的长江三角洲、以天津为代表的环渤海区和西安等地。

2 地面沉降灾害原因

地面沉降成因主要包括开发利用地下流体资源(地下水、石油、天然气等)、开采固体矿产、岩溶塌陷、软土地区与工程建设有关的固结沉降等,此外还包括新构造运动、动土融化等因素。

2.1 开发利用地下流体资源

(1) 地下水开采引起的地面沉降

在许多国家和地区^[12-17]由于抽取地下水引起地面沉降。在台湾由于抽取地下水引起的地面沉降总面积达 1 890 km²^[18];美国加利福尼亚州 San Joa-

quin 峡谷开采地下水产生了达 9 m 的地面沉降^[19]。20 世纪 20 年代,上海、天津在市区集中开采地下水的地区发生地面沉降,到 60 年代两市地面沉降灾害已十分严重。

(2) 开发利用石油天然气资源

美国德克萨斯州等地由于碳氢化合物的开采诱发地面沉降^[20-24];胜利油田开采区的平均沉降量 10 mm/a 左右,现河采油厂的耿家井附近 15 年下沉量为 378 mm,平均沉降 25.2 mm/a^[25];20 世纪 80 年代中期大庆油田为了增加原油产量采取了注水采油的方法,从而产生区域性地面沉降,1978—1991 年期间累计地面沉降量达 1.5 m^[26-27]。

(3) 开发利用地热资源

进入 90 年代以来,昆明市地下热水的开采规模扩大,1999 年达 22 000 m³/d 以上,累计开采量已超过 1 亿 m³^[28]。

2.2 岩溶塌陷

中国可溶岩分布面积达 365 万 km²,占国土面积的 1/3 以上,是世界上岩溶最发育的国家之一。近年来随着岩溶地区国民经济的飞速发展,岩溶区土地资源、水资源和矿产资源开发的不断增强,由此引发的岩溶塌陷问题日益突出,已成为岩溶地区主要地质灾害问题。仅广西、云南、贵州、四川和重庆等五个西南省区就已发生岩溶塌陷 859 次,占全国岩溶塌陷总数的 78%^[29]。

2.3 开采固体矿产

矿区采空塌陷分布在各矿区,以采煤塌陷最为突出。南斯拉夫吐斯拉城岩盐矿经过近 100 年的开采,盐土层水压力下降,地面最大沉降量达 10 m;波兰最大铜矿莱格纳卡产生超越开采区的巨大沉降槽,地面最大沉降量达 0.8 m;中国有 20 个省区共发生采空塌陷 180 处以上,塌陷面积大于 1 150 km²,以黑龙江、山西、安徽、山东、河南等省最为严重。

2.4 工程环境效应

工程建设是近年来新的沉降制约因素^[30],在地区城市化进程中不断显露,在部分地区的大规模城市改造建设中地面沉降效应明显。

上海的地面沉降问题开始于 20 世纪 20 年代近代工业形成以后,由于对地下水资源不合理的集中开采,引起地面沉降急剧发展,最大年沉降速率曾超过 110 mm,最大累积地面沉降量达 2.63 m,成为我国地面沉降发生最早、影响最大、危害最深的城市。60 年代中期开始上海对地面沉降进行了综合治理,

结合地下水资源的系统管理实施了一系列控制沉降措施,使地面沉降总体保持在每年数毫米的微量沉降状态,基本实现对地面沉降的有效与持续性控制。

进入 90 年代以来城市基础设施建设迅猛发展,旧区改造、新居住区开发,大量高层、超高层建筑的兴建,在此条件下工程建设引起的地面沉降效应逐渐凸出,成为上海近年来新的沉降发展因素。监测成果显示,建国后至 1965 年上海地面沉降量年均 65 mm,1966—1971 年地面年均回弹 3.2 mm,1972—1989 年年均沉降量 3.5 mm。但进入 90 年代以来,中心城区年均沉降量为 11.9 mm,这与产业结构调整引起的全市地下水采灌数量、布局改变及大规模城市工程建设有密切关系。

上海城区大规模的工程建设,特别是重大市政工程和高层建筑物的建设对中心城区的地面沉降带来了严重影响,城市工程建设引起的沉降约占近期总体沉降的 30%。根据近年来市区地下水采灌量及土层变形分层监测统计结果,地下水开采造成的土层变形主要集中在 70 m 以深土层,而 70 m 以浅土层的变形主要是城市工程建设引起的。在城区严格控制地下水开采的情况下,城区产生过大地面沉降量(年均 10 mm 以上)与大规模的工程建设、过大的建筑容积率有关。

进入 20 世纪 90 年代,上海地面又明显出现加速沉降现象,中心城区年均沉降量是前一时期的 4 倍多,如图 1 所示。由于上海中心城区地下水的开采得到严格控制,而且回灌量一直大于开采量,地下水动态历年来基本保持稳定,并在区域与层次上的展布也较为均衡,抽灌地下水引发地面沉降的发展过程中心城区较为平缓。在此背景下上海中心城区大规模城市建设诱发的工程建设效应引起密切关注。对于工程建设等环境效应引起的地面沉降,国内外对这方面的研究很少,同济大学地下建筑与工程系的工程地质研究所对此展开了初步研究,并同上海地质调查研究院进行合作研究。

3 地面沉降机理

抽汲地下水(或石油与天然气)时,伴随着地下水从沉积含水层组中,尤其在那些厚层的半固结淤泥、粘土层(弱含水层)组中排出,含水层的孔隙体积和总体蓄水能力大幅度减少,并且不能完全恢复,最终表现为地面沉降。这类沉降的成因有二种机理:一个是有效应力原理,另一个是水动力固结理论。这两个原理将含水层的压实分为两个过程,前者解

释了含水层在抽水过程中的压实引发的地面沉降,后者解释了抽水以后的残余压实引发的地面沉降。根据有效应力理论,抽水以前上覆土层和水的重力由孔隙水压力和粒间有效压力共同平衡;抽水后总压力不变,孔隙水压力降低,有效压力增加,这样颗粒骨架所受压力增加,土层被压缩,微观上表现为颗粒之间的孔隙度降低,宏观上表现为含水层变薄。抽水结束后,地面沉降并未停止,这可以用水动力固结理论来解释:在抽水过程中透水层的放水速度比弱透水层快,因而水位下降也快,停止抽水后,由于两类含水层之间水位高度不同,存在水位差,而表现为弱透水层向透水层渗水,弱透水层因而继续有压实作用,仍有沉降发生。

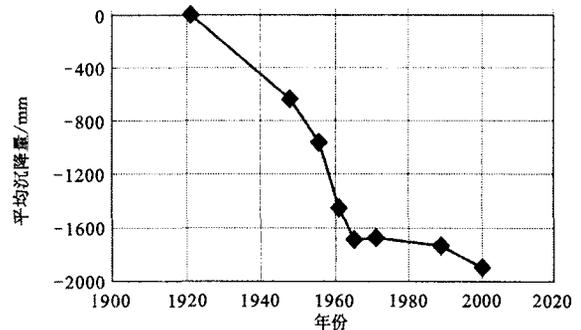


图 1 上海市地面沉降发展历程

Fig. 1 Process of land subsidence in Shanghai.

4 地面沉降灾害预测与监测

4.1 地面沉降预测

国内外有关地面沉降的预测方法很多,主要有模糊神经网络、灰色理论^[31-32]等。例如王寒梅和唐益群等利用灰色理论建立非等时距 GM(1,1)模型,对上海路家嘴地区因工程环境效应因素引起的地面沉降进行了预测,并和实测数据进行了比较,预测值与实测结果基本相符,具有较好的精度。李涛和潘云等^[31]在分析天津市地面沉降特点的基础上,结合人工神经网络原理,预测了 2010 年天津市地面沉降的情况。当沉降均匀平稳时,宜采用灰色预测,当沉降波动较大时,宜采用人工神经网络预测。沉降是一个受多方面因素影响的复杂过程,其影响因素与沉降之间存在复杂的非线性关系,正确选择预测方法和建立相应的模型,对于精确的预测沉降和防止事故的发生显得尤为重要。

4.2 地面沉降监测

地面沉降的监测技术日益先进,全球定位系统(GPS)已经逐渐取代区域性水准测量得到广泛的应

用。日本的 Hiroshi^[33] 利用 GPS 技术量测了新泻的地面沉降,绘制了沉降变化图。上海市于 20 世纪 60 年代初期开始建立地面沉降监测网络^[34-35],采取多种措施进行防治,使地面沉降得到了有效控制。90 年代以来,由于大规模的城市建设,高层建筑荷载及市周边地区增加开采地下水,致使中心城区地面沉降处于新的加速沉降阶段。上海建立了长江三角洲统一的地面沉降 GPS 监测网、完成了地面沉降信息系统(LSIS)、编制了地面沉降有关图件等;美国正在研制用于探测地面沉降的干涉合成孔径雷达(InSAR)监测技术^[36]。

5 总结

本文对国内外地面沉降的现状、地面沉降灾害发生的原因、地面沉降机理以及地面沉降灾害预测与防治,作了系统全面的论述。指出随着大规模的城市建设,高层建筑群等工程环境效应成为地面沉降新的制约因素,有必要对此因素展开深入研究,降低地面沉降灾害造成的经济损失。如何通过理论分析和试验研究确定最佳建筑间距和最佳建筑容积率,以此降低地面沉降,成为一个重要的研究课题。

【参考文献】

- [1] O Guerrero, D L Rudolph, J A Cherry. Analysis of long-term land subsidence near Mexico City: field investigations and predicative modeling[J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(11):3327-3341.
- [2] Miura N, Taesiri Y, Sakai A. Land subsidence and its influence to geotechnical aspect in Saga plain[A]// *Proceedings of the international symposium on shallow sea and lowland*[C], Saga, Japan:ILT, Saga University, 1988.
- [3] P Teatini, M Ferronato, G Gambolati, et al. A century of land subsidence in Ravenna, Italy[J]. *Environ. Geol.*, 2005, (47):831-846.
- [4] Gambolati G, Teatini P, Tomasi L, et al. Coastline regression of the Romagna region, Italy, due to sea level rise and natural and anthropogenic land subsidence[J]. *Water Resour. Res.*, 1999, 35(1):163-184.
- [5] Bertoldi G L. Where do we go from here: a new initiative for subsidence research in the United States[A]// *Annual Meeting of the symposium on land subsidence*[C]. California: California institute of technology press, 1995.
- [6] 张阿根,魏子新. 中国地面沉降[M]. 上海:上海科学技术出版社, 2005.
- [7] R L Hu, Z Q Yue, L C Wang, et al. Review on current status and challenging issues of land subsidence in China[J]. *Engineering Geology*, 2004, 76: 65-77.
- [8] 严礼川. 我国城市地面沉降概况[J]. *上海地质*, 1992, (1):40-48.
- [9] 郑铤鑫,武强,侯艳声,等. 城市地面沉降研究进展及其发展趋势[J]. *地质评论*, 2002, 48(6):612-618.
- [10] Yu-Qun Xue, Yun Zhang, Shu-Jun Ye, et al. Land subsidence in China[J]. *Environ. Geol.*, 2005, (48):713-720.
- [11] 薛禹群,张云,叶淑君,等. 中国地面沉降需要解决的几个问题[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(6):585-593.
- [12] Musavi S M, Khamchhiyan M, Shamsai A. Land subsidence due to groundwater withdrawal[A]//*International Water Resources Engineering Conference-Proceedings, After the rain has fallen*[C]. Tennessee:Memphis Press, 1998, 75-80.
- [13] Sun H, Grandstaff D, Shagam R. Land subsidence due to groundwater withdrawal: Potential damage of subsidence and sea level rise in southern New Jersey, USA[J]. *Environmental Geology*, 1999, 37(4): 290-296.
- [14] Nguyen T Q, Helm D C. Land subsidence due to groundwater withdrawal in Hanoi [J]. *International Association of Hydrological Sciences*, 1995, 234: 55-60.
- [15] Lebbe L. Land subsidence due to groundwater withdrawal from the semi-confined aquifers of southwestern Flanders [J]. *International Association of Hydrological Sciences*, 1995, 234: 47-54.
- [16] Hix G L. Land subsidence and groundwater withdrawal[J]. *Water Well Journal*, 1995, 49(11):37-39.
- [17] Chai J C, Shen S L, Zhu H H, et al. Land subsidence due to groundwater drawdown in Shanghai [J]. *Geotechnique*, 2004, 54(2):143-147.
- [18] Ao-Chang Yang, Pao-Shan Yu. Application of Fuzzy Multi-Objective Function on Reducing Groundwater Demand for Aquaculture in Land-Subsidence Areas[J]. *Water Resources Management*, 2006(20): 377-390.
- [19] K J Larson, H Basagaoglu, M A Marino. Prediction of optional safe ground water yield and land subsidence in the Los Banos-Kettleman City area, California, using a calibrated numerical simulation model[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 242(1-2): 79-102.
- [20] Poland J F, Davis G H. Land subsidence due to withdrawal of fluids. In: *Man and his physical environment*[A]// *Readings in environmental geology* [G]. New York: Burgess Publ., 1972: 77-90.
- [21] Van Hasselt J P. Reservoir compaction and surface subsidence resulting from oil and gas production[J]. *Geol. Mijnbouw*, 1992, 71:107-118.
- [22] Chilingarian G V, Donaldson E C, Yen T F. Subsidence due to fluid withdrawal. *Developments in Petroleum Science*[M]. Amsterdam: Elsevier Science, 1995.

明显的异常特征。最主要的特点是远离台站的地震(区域场中的地震),一般发生在地电阻率各向异性值的极大值附近区域,发生在低值区的可能性很小,即地电阻各向异性变化存在一个高值易发震变化区间。

[参考文献]

- [1] 杜学彬,阮爱国,范世宏,等. 强震近震中区地电阻率变化速率的各向异性[J]. 地震学报, 2001, 23(3): 289-297.
- [2] Crampin S, Evan R, Atkinson B K. Earthquake prediction : a new physical basis[J]. Geophys. J. R. Astr. Soc., 1984, 76 (1).
- [3] 钱家栋,陈有发,金安忠. 地电阻率法在地震预报中的应用[M]. 北京:地震出版社. 1985.
- [4] 杜学彬,薛顺章,张世中,等. 地电阻率中短期异常与地震的关系[J]. 地震学报, 2000, 22(4): 368-376.
- [5] 梅世蓉,冯德益,张国民,等. 中国地震预报概论[M]. 北京:地震出版社, 1993.
- [6] 马占虎,杜学彬,谭大成,等. 地震电性变化及其物理机理初步讨论[J]. 西北地震学报, 2004, 26(3): 234-239.
- [7] 阮爱国,卢军,符琼玉,等. 两次大震的视电阻率各向异性特征[J]. 华南地震, 2004, 24(4): 1-7.
- [23] Nagel N B. Compaction and subsidence issues within the petroleum industry: from Wilmington to Ekofisk and beyond [J]. Phys. Chem. Earth. 2001, (26): 3-14.
- [24] Chilingar G V, Endres B. Environmental hazards posed by the Los Angeles Basin urban oilfields: an historical perspective of lessons learned [J]. Environ. Geol., 2005, (47): 302-317.
- [25] 刘桂仪,张兴乐. 黄河三角洲油气资源开发的环境地质问题与经济可持续发展[J]. 上海地质, 2001, (增刊): 94-96.
- [26] 周永昌,李保清,陈菊红. 大庆油田地面沉降成因分析[A]// 第七届国际地面沉降学术研讨会论文集[C]. 上海:上海科学技术出版社, 2005.
- [27] 薛传东,李保珠,魏红霞. 昆明市地面沉降的机理分析[A]// 第七届国际地面沉降学术研讨会论文集[C]. 上海:上海科学技术出版社, 2005.
- [28] 雷明堂,蒋小珍,等. 城市岩溶塌陷地质灾害风险评估[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2000, 11(4): 23-27.
- [29] 唐益群,崔振东,王兴汉,等. 密集高层建筑群的工程环境效应引起地面沉降初步研究[J]. 西北地震学报, 2007, 29(2): 105-108.
- [30] 崔振东,唐益群,郭长青. 叠层板状结构在非线性支承下的流固耦合振动[J]. 西北地震学报, 2007, 29(2): 119-122.
- [31] 李涛,潘云,等. 人工神经网络在天津市地面沉降预测中的应用[J]. 地质通报, 2005, 24(7): 677-681.
- [32] Hiroshi P Sato, Kaoru Abe, Osamu Otaki. GPS-measured land subsidence in Ojiya city, Niigata Prefecture, Japan [J]. Engineering Geology, 2003(67): 379-390.
- [33] 殷跃平,张作辰,张开军. 我国地面沉降现状与防治措施[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(2): 1-8.
- [34] 刘毅. 地面沉降研究的新进展与面临的新问题[J]. 地学前缘, 2001, 8(2): 273-278.

(上接 278 页)